专刊：科技支撑“双碳”目标实现
S&T Supporting Realization of Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals

科技战略研究
Strategic Research on Science and Technology

引用格式：曲建升, 陈伟, 曾静静, 等. 国际碳中和战略行动与科技布局分析及对我国的启示建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 444-458.
Qu J S, Chen W, Zeng J J, et al. Analysis of international carbon neutralization strategic actions and technology layout and enlightenment suggestions to China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 444-458. (in Chinese)

国际碳中和战略行动与科技布局分析及对我国的启示建议

曲建升[1,5*] 陈 伟[2,5*] 曾静静[3,5] 孙玉玲[4,5] 廖 琴[3] 郭楷模[2] 秦阿宁[4] 裴惠娟[3] 滕 飞[4] 刘燕飞[3]
岳 芳[2] 刘莉娜[3] 汤 匀[2] 李岚春[2]

1 中国科学院成都文献情报中心 成都 610041
2 中国科学院武汉文献情报中心 科技大数据湖北省重点实验室 武汉 430071
3 中国科学院西北生态环境资源研究院 文献情报中心 兰州 730000
4 中国科学院文献情报中心 北京 100190
5 中国科学院大学 经济与管理学院 北京 100049

摘要 实现碳达峰、碳中和是以习近平同志为核心的党中央做出的重大战略决策，将带来经济社会广泛而深刻的系统性变革。科技是支撑碳中和目标的核心驱动力。文章在梳理碳中和相关概念基础上，分析了发达国家/地区和国际组织碳中和的战略行动和科技布局特点，发现：各主要国家通过立法监管、能源战略、技术路线图、碳市场等政策行动全面推动碳中和目标；在科技方面，重点布局可再生能源、氢能、储能、先进核能、碳捕集利用与封存（CCUS）等变革性绿色低碳技术，抢占未来绿色工业革命科技制高点。文章针对实现碳中和的“减排”和“增汇”两条根本路径，围绕“构建零碳能源体系”“再造低碳产业流程”“生态固碳增汇/负排放”三大方向提出了需要重点布局的14个重要科技问题研究，以引导超过70项关键技术突破。在分析碳中和国际行动和关键科技问题基础上，围绕加强碳达峰、碳中和行动顶层设计，强化面向碳中和的科技研发体系，建立零碳能源体系和新型电力系统，构建低碳产业体系，前瞻部署生态固碳等负排放技术，以及加强系统性解决方案在碳中和行动中的应用6个方面，提出了加强我国碳中和战略科技布局的建议。

关键词 碳中和，战略行动，科技创新，零碳能源，低碳产业，碳汇

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210829001

---

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA21010103），中国科学院文献情报能力建设专项（E129042901）
修改稿收到日期：2022年3月29日

1 碳中和内涵与发展

人类活动已造成全球气温较工业化前水平升高约 1℃。按照这一趋势，2030—2052 年升温幅度将达到 1.5℃[1]，自然和人类系统将面临更高的气候风险。2015 年，195 个国家达成《巴黎协定》，确立了全球应对气候变化威胁的总体目标：将全球升温幅度限制在低于 2℃，并力争将其限制在 1.5℃ 以内[2]。若要将全球升温限制在 1.5℃，全球碳排放需在 2030 年前减半，并在 21 世纪中叶达到“净零”[1]（即碳中和）。

“碳中和”（carbon neutrality）一词最早出现在 20 世纪 90 年代初，早期主要用于描述植物存活时吸收的二氧化碳量等于其释放的二氧化碳量的情况①。1997 年，英国的未来森林（Future Forests）公司将碳中和作为商业策划概念提出，主要从能源技术角度关注实现碳中和的路径[3]。

自 2000 年以来，碳中和这一概念变得越来越重要。2006 年，碳中和被《新牛津美语辞典》评为年度词汇。2010 年，英国标准学会（BSI）制定发布《碳中和承诺规范》，从产品层面提出了碳中和的定义、认证标准及宣告碳中和的方法，指出碳中和可通过减少和抵消温室气体排放来实现[4]。

2018 年，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）给出了涉及“碳中和”（carbon neutrality）、“二氧化碳净零排放”（net zero CO_2 emissions）、“净零排放”（net zero emissions）和“气候中和”（climate neutrality）4 个概念的具体定义[1]。其中，“碳中和”与“二氧化碳净零排放”的内涵一致，是指在规定时期内全球人为二氧化碳去除量抵消人为二氧化碳排放量，实现二氧化碳净零排放；“净零排放”是指规定时期内人为温室气体去除量可以抵消人为温室气体排放量，不仅针对二氧化碳排放，还涉及其他温室气体；“气候中和”是指人类活动对气候系统没有产生净影响，这是从对气候系统的影响角度出发来定义的，与“碳中和”从排放角度定义不同。

我国于 2020 年 9 月提出了“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标。目前，国际上各国做出的碳中和承诺相关表述与 IPCC 定义存在一定差异[5,6]，部分国家以碳中和或净零碳排放为目标，但其目标中的碳指代了包含二氧化碳在内的所有温室气体；部分国家出于产业结构的考虑，明确提出碳中和目标不包含特定的温室气体。

碳中和的目标需要从减少碳排放量和增加碳去除量 2 个方面共抓方能实现（图 1）。一方面，需要能

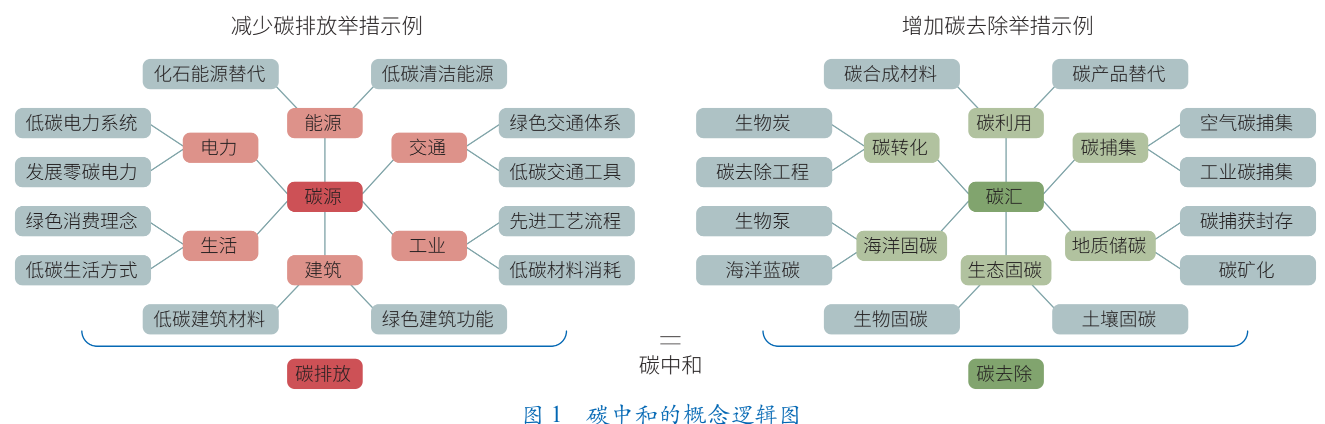


图 1　碳中和的概念逻辑图
Figure 1　Diagram of carbon neutrality

① Macmillan Dictionary. Definition of carbon neutral, BuzzWord from Macmillan Dictionary. (2007-02-02)[2022-03-29]. https://www.macmillandictionary.com/buzzword/entries/carbon-neutral.html.

源、工业、建筑和交通等部门极大地提高能源效率、高比例利用非化石能源，在最大程度上进行减排；另一方面，仍不能完全避免的碳排放需要通过人为增强自然生态系统等碳汇能力，或者通过碳捕集、利用与封存（CCUS）技术等碳去除技术进行碳利用或封存。碳减排与碳去除双管齐下的强力推进必将对工业革命以来由化石能源驱动的经济社会体系带来巨大冲击，并必将推进全维度社会系统的转型升级，世界各国和科技界均对此给予了高度的重视。

2 国际碳中和战略行动布局

当前，主要国际组织积极协调行动，推动人类社会向碳中和转型。例如，联合国环境规划署发布推动能源、工业、建筑和城市、交通、农业和食品、森林和土地利用六大重点行业向碳中和转型的举措[7]；国际能源署深入分析 2050 年全球能源行业实现净零排放的路径，呼吁各国政府加快清洁能源创新[8]；国际可再生能源机构呼吁全球加快构建以可再生能源、绿色氢能和现代生物质能为主的能源体系[9]；联合国全球契约组织提出全球企业实现碳中和的方案[10]。围绕碳循环、数字技术、电池储能、低碳供热和制冷、氢能、CCUS、碳汇、土地利用与全球粮食系统等领域的科技部署对实现碳中和目标至关重要[11]。

截至 2021 年 8 月 31 日，全球有 130 多个国家提出了碳中和目标②。其中，将碳中和作为发展目标的以发达国家为主，而发展中国家数量较少③。本文梳理了主要发达国家/地区近期的相关战略行动（图 2），从中可以发现：① 逐渐采取立法形式确定碳中和目标，并加强相关工作的监管与推进，但法律实施力度尚不明确；② 密集发布清洁能源相关战略，加快推进氢能等新兴产业发展（表 1），同时对氢能在制备、储运和应用方面的发展路径有着不同的侧重；③ 制定新冠肺炎疫情后的绿色复苏计划，通过绿色投资方式促进经济低碳转型发展等。

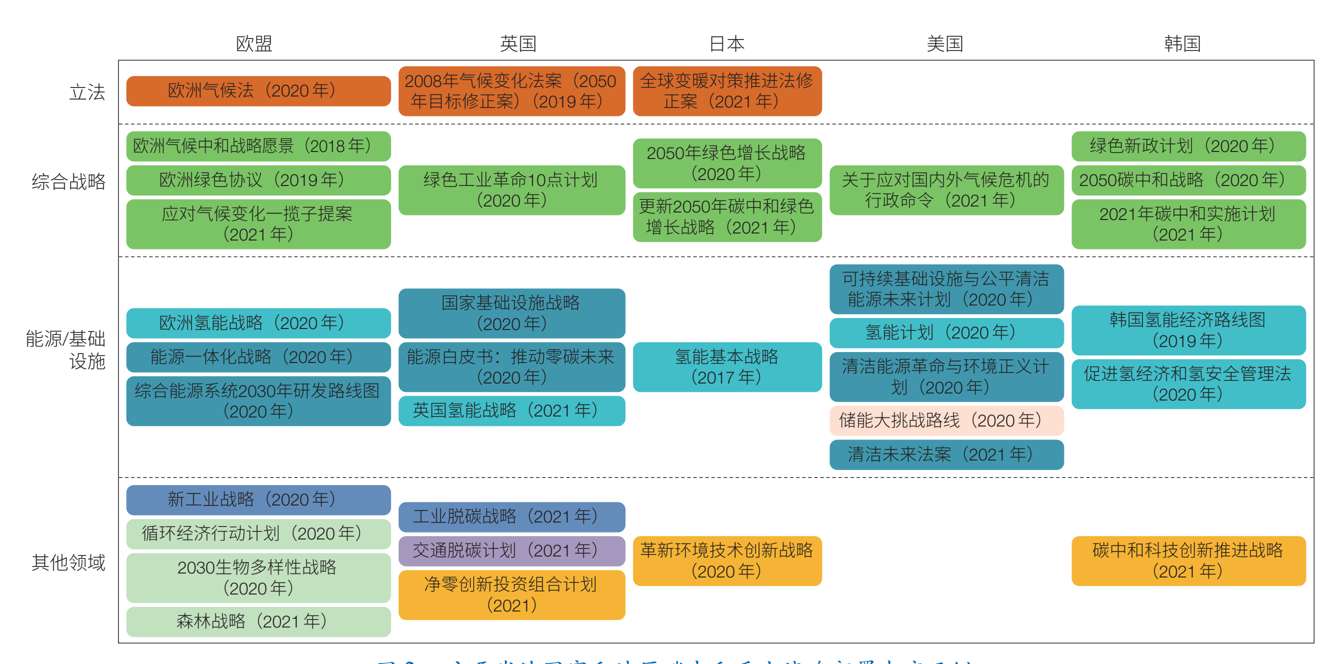


图 2　主要发达国家和地区碳中和重点战略部署内容示例

Figure 2　Key strategic plans towards carbon neutrality in major developed countries/regions

② Energy & Climate Intelligence Unit. Net Zero Emissions Race. (2021-08-31)[2022-03-29]. https://eciu.net/netzerotracker.

③ 李超 . 中国碳中和与欧美相比有何异同？—碳中和系列研究六 . (2021-03-27)[2022-03-29]. http://wap.hibor.com.cn/repinfodetail_762422.html.

表1　主要国家和地区氢能战略比较

Table 1　Comparison of hydrogen strategies in major countries/regions

国家/地区	战略名称	发布年份	主要目标	主要路径（制氢）
欧盟	《欧洲氢能战略》[12]	2020年	开发主要利用风能和太阳能生产的可再生氢能	2020—2024年：安装至少6 GW的可再生氢能电解槽，可再生能源制氢年产量达1 Mt 2024—2030年：安装至少40 GW的可再生氢能电解槽，可再生能源制氢年产量达10 Mt，电解槽投资为240亿—420亿欧元 2030—2050年：可再生氢能技术逐渐成熟并大规模部署，生产投资达到1 800亿—4 700亿欧元
英国	《英国氢能战略》[13]	2021年	到2030年拥有5 GW的低碳氢生产能力	2022—2024年：小规模电解生产 2025—2027年：至少一个地点进行大规模CCUS项目，电解生产规模不断扩大，2025年拥有1 GW的生产能力 2028—2030年：多个大规模CCUS项目，多个大规模电解生产项目 2035年以后：扩大生产规模与范围（如核能、生物质）
日本	《氢能基本战略》[14]	2017年	2030年左右实现氢能发电商用化，氢能与其他燃料的成本平价	2020年：以化石燃料制氢为主，正在进行氢能供应链的开发及量产示范 2030年：开拓国外氢能供应链，开发国内电制气 2050年以后：可再生能源制氢
美国	《氢能计划规划》[15]	2020年	致力于氢能全产业链的技术研发，实现产业规模化	近期和中期：配备CCUS的煤炭、生物质和废弃物气化制氢技术，先进的化石燃料和生物质重整/转化技术，电解制氢技术 中远期：先进生物/微生物制氢，先进热/光电化学水解制氢
韩国	《韩国氢能经济路线图》[16]	2019年	到2040年生产620万辆氢燃料电池汽车，建成1 200座加氢站	近期和中期：以化石燃料制氢为主 中远期：氢气主要来源于可再生能源电解制氢

2.1 欧盟：构建顶层设计较完善的碳中和政策体系，将能源系统转型作为经济脱碳的战略重点

*作为全球率先提出碳中和目标、政策法律体系较完善的大型经济体，欧盟设置了阶段性减排规划。*2018年11月，欧盟首次提出2050年气候中和愿景[17]。2019年12月，欧盟发布《欧洲绿色协议》[18]，提出到2030年实现温室气体排放比1990年水平减少50%—55%，到2050年实现气候中和的目标，并制定了能源、工业、建筑、交通、农业、生态和环境等领域的转型路径。2020年3月，欧盟委员会提交《欧洲气候法》[19]草案，从法律层面确保欧洲到2050年实现气候中和。2021年7月，欧盟通过了涵盖欧盟排放交易体系、市场稳定储备、海事、航空、建筑、道路运输、土地等方面的一揽子提案④，提出到2030年可再生能源占终端能源消费的40%等目标。2020年以来，欧盟还发布了《能源系统一体化战略》[20]、《欧洲氢能战略》、《综合能源系统2020—2030年研发路线图》[21]、《欧洲新工业战略》[22]、《循环经济行动计划》[23]、《2030年生物多样性战略》[24]、《森林战略》[25]等领域战略规划，通过减少排放、投资绿色技术和保护自然环境等路径实现温室气体净零排放。

*推动能源系统转型被视为欧盟实现气候中和目标的关键驱动因素。*欧盟将在提高能源效率，发展可再生能源，发展可持续和智能交通，发展竞争性产业和循环经济，推动基础设施建设和互联互通，发展生物经济和天然碳汇，发展CCUS等领域开展联合行动[26]。欧盟以可再生能源为核心替代化石能源，不断提高电气化，将发电转型为风电占比最大，光伏、潮

④ European Commission. Delivering the European Green Deal. (2021-07-14)[2022-03-29]. https://ec.europa.eu/clima/news/delivering-european-green-deal_en.

汐和核能并重的模式，推进氢能、电制气技术进步，实现可再生能源电力与其他能源的整合⑤。

欧盟拥有全球最成熟的碳交易系统，主要对能源、工业和航空行业碳排放进行约束。欧盟未来将对交通和建筑行业进一步约束，并收紧碳交易系统。欧盟还将于2026年开始全面实施碳边境税，对钢铁、水泥、化肥、铝等进口商品征收关税。

2.2 英国：围绕多行业布局具体脱碳战略，重点资助优势低碳技术的研发

英国是全球最早以法律形式确立减排目标的国家，并围绕重点行业制定了详细的减排战略。英国在《2008年气候变化法》中设定了2050年减排80%的目标，2019年6月将其修订为实现温室气体净零排放[27]。2021年4月，英国再次宣布到2035年将温室气体排放量减少78%（与1990年的水平相比）⑥。英国《绿色工业革命十点计划》从海上风电、氢能、核能、零排放汽车、绿色公共交通、零排放喷气式飞机和绿色航运、绿色建筑、CCUS、自然保护、绿色金融与创新10个方面部署了英国加速实现温室气体净零排放的整体路径[28]。能源、工业、交通、基础设施、建筑等领域减排是英国实现净零排放目标的关键，英国为此制定专门脱碳战略，提出了各行业的针对性目标，包括：《国家基础设施战略》[29]、《能源白皮书：推动零碳未来》[30]、《工业脱碳战略》[31]、《交通脱碳计划》[32]、《英国氢能战略》等。

英国高度重视其最具优势的低碳技术研发。英国在温室气体去除、CCUS、可再生能源、建筑和工业减排等重点技术领域部署了系列研究行动⑦。2021年3月，英国启动资助金额为10亿英镑的净零创新投资组合计划⑧，用于开发关键的低碳技术，重点聚焦海上风电、先进模块化反应堆、储能与灵活性、氢能、生物质能、工业燃料转换、先进CCUS、家庭住宅、直接空气捕集、温室气体去除和颠覆性技术等优先领域。

2.3 美国：将气候纳入外交和国家安全核心，加速清洁能源技术创新发展

2021年，美国总统拜登宣布重返《巴黎协定》，提出2035年实现无碳电力、2050年实现碳中和的最新目标，并以行政命令形式明确提出将应对气候危机置于美国外交政策与国家安全的中心⑨，计划通过设立白宫国内气候政策办公室、成立国家气候特别工作组、制定联邦清洁电力和汽车采购战略、取消化石燃料补贴等系列措施推动碳中和进程。此外，美国的一些州政府还推出了比联邦政府更为完善的碳中和政策，这也是美国的一大特色。

拜登政府致力于加速清洁能源创新技术的发展，确保2050年实现100%的清洁能源经济。通过相继发布《美国能源创新法案》[33]、《建设现代化、可持续的基础设施与公平清洁能源未来计划》⑩、《清

⑤ 中研顾问．“碳中和”专题系列研究报告：碳中和对标与启示（欧盟篇）. (2021-07-21)[2022-03-29]. https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210721/1165059.shtml.

⑥ Department for Business, Energy & Industrial Strategy. UK enshrines new target in law to slash emissions by 78% by 2035. (2021-04-20)[2022-03-29]. https://www.gov.uk/government/news/uk-enshrines-new-target-in-law-to-slash-emissions-by-78-by-2035.

⑦ Prime Minister’s Office. PM Commits £350 Million to Fuel Green Recovery. (2020-07-22)[2022-03-29]. https://www.gov.uk/government/news/pm-commits-350-million-to-fuel-green-recovery. UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy. £166 Million Cash Injection for Green Technology and 60,000 UK Jobs. (2021-05-24)[2022-03-29]. https://www.gov.uk/government/news/166-million-cash-injection-for-green-technology-and-60000-uk-jobs.

⑧ UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Net Zero Innovation Portfolio. (2021-03-24)[2022-03-29]. https://www.gov.uk/government/collections/net-zero-innovation-portfolio.

⑨ The White House. Executive Order on Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad. (2021-01-27)[2022-03-29]. https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/27/executive-order-on-tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad/.

⑩ Biden Harris. The Biden Plan to Build a Modern, Sustainable Infrastructure and an Equitable Clean Energy Future. [2022-03-29]. https://joebiden.com/clean-energy/.

洁能源革命与环境正义计划》[⑪]、《储能大挑战路线图》[34]、《清洁未来法案》[35]等有关清洁能源的政策，计划投入2万多亿美元，用于交通、建筑和清洁能源等重点领域的投资，以加速清洁能源技术创新，支持清洁能源经济转型。

2.4 日本和韩国：重点部署碳中和整体方案，通过绿色技术着力发展低碳循环产业

继中国之后，日本和韩国相继提出2050年碳中和目标。

日本。2020年12月，发布《2050年绿色增长战略》[36]，针对能源、交通、制造业、建筑等14个产业，提出了到2050年实现碳中和的发展目标和重点任务，以推进产业电气化发展及循环经济转型，推动电力部门深度脱碳，加快发展碳循环和资源化利用。2021年6月，更新《2050年碳中和绿色增长战略》[37]，将海上风电产业纳入新一代可再生能源产业体系，合并氨燃料和氢能产业，并新增了新一代热能产业。

韩国。2020年12月，发布《2050年碳中和战略》[38]，提出经济结构低碳化、构建低碳产业生态圈、建成公平公正的低碳社会，以及强化碳中和制度建设的“3+1”举措，旨在到2050年实现碳中和。“绿色新政”计划将投资73.4万亿韩元，支持绿色基础设施、新能源及可再生能源、绿色交通、绿色产业和CCUS等绿色技术的发展[39]。同时，《碳中和科技创新推进战略》确定了氢能、太阳能和风能、生物能源、CCUS、钢铁和水泥、石油化工、工业流程改进、运输能效、建筑能效和数字化等10项实现碳中和的关键核心绿色技术[40]。

2.5 各国碳中和战略的科技布局共性特点分析

通过梳理发达国家和地区碳中和战略布局的重点技术清单（表2），可以得出3个共性特点：① 构建零碳能源体系是各国战略布局的核心。重点是大力发展可再生能源，逐步减少煤炭等化石燃料使用，推动能源终端消费电气化。② 促进产业低碳转型是各国建立绿色经济的着力点。大力推动高能耗、高排放工业部门低碳和零碳转型，重点建立低碳产业示范集群，加速建筑节能改造和绿色转型，推进交通电气化、绿色化。③ 保护并增强陆地和海洋生态系统固碳能力是各国提高气候治理水平的重要途径。加大增强自然碳汇的行动部署，并构建多元负排放技术体系。

实现碳中和目标是一项艰巨的挑战，要求各国清洁能源技术创新发生质的飞跃。根据国际能源署的统计，全球电气化、氢能、生物能源及CCUS等关键技术领域的创新投入仅为成熟低碳发电技术和能效技术公共研发资金的1/3，并且到2050年几乎一半的减排量将来自目前还处于示范或原型开发阶段的技术[8]。当前各国的研究部署与实现碳中和目标还存在巨大的差距，必须通过加强跨领域交叉研究来破解碳中和相关的重大科学问题，引导技术突破形成全面支撑碳中和愿景的核心技术体系。

3 碳中和工作中的重要科技问题

碳中和涉及领域极为广泛，涵盖了电力、化工、钢铁、水泥、交通、建筑等系列产业，与国家能源结构和产业结构息息相关。要实现人为碳源排放降低与人为碳汇的增强，涉及能源、资源、生态、大气、海洋、工程、技术、管理等诸多学科及其综合研究，同时这一延续数十年的重大课题也将带动前沿技术、颠覆性技术的多轮迭代、接续发展。通过综合分析国际碳中和战略行动布局及碳中和的科技内涵，本文研究团队开展专家调查法（德尔菲法）和文献调研，编制形成了技术清单；针对实现碳中和所需的“减排”和“增汇”两条根本路径，围绕“构建零碳能源体

⑪ Biden Harris. The Biden Plan for a Clean Energy Revolution and Environmental Justice. [2022-03-29]. https://joebiden.com/climate-plan/.

表 2 主要发达国家和地区碳中和战略布局重点技术

Table 2 Key technologies for carbon neutrality strategies in major developed countries/regions

国家/地区	重点技术
美国	小型模块化反应堆、核聚变、绿氢、CCUS、电池储能、下一代低碳建筑、可再生能源、先进核能、可持续航空燃料、生物燃料、电动汽车、气候智能型农业等
欧盟	可再生能源、氢能、综合能源系统、智能电网、储能、CCUS、工业脱碳和数字化转型、绿色建筑、可持续和智能交通、精准农业、有机农业生态系统、生物经济、合成低碳燃料等
德国	绿氢、储能、电动汽车、智能电网、交通网络电气化、生物燃料、燃料电池、低排放工业生产技术、气候与环境友好型建筑、数字化能源系统、热电联产现代化、生态农业等
法国	可再生能源、核能、绿氢、能源网络、生态城市、工业脱碳、CCUS、绿色交通基础设施、电动汽车、生物基产品和可持续燃料、可持续农业系统等
英国	储能、氢能、海上风电、先进核能、电动汽车、交通网络电气化、零排放飞机、可持续交通燃料、清洁航运、绿色建筑、工业燃料转型、生物能源、直接空气碳捕集和先进CCUS、环境保护、能源领域人工智能等
日本	可再生能源、氢能与氨燃料、供热脱碳、先进核能、核聚变、电动汽车、储能、零排放船舶、智慧农林渔业、低碳半导体、航空电气化、碳资源化利用、净零排放建筑、资源回收再利用等
韩国	可再生能源、零能耗建筑、智能电网、电动汽车、氢能与燃料电池、资源回收再利用、氢还原炼铁、低碳燃料、智慧工厂、低碳半导体、生物能源、CCUS、智慧能源管理系统、智慧农业渔业、碳汇等

系”“再造低碳产业流程”“生态固碳增汇/负排放”三大布局方向，梳理出 14 个重要科技问题，归纳提出了面向近、中、远期不同发展阶段的超过 70 项关键技术突破需求（图 3）。需要说明的是，这里提出的技术尺度是方向性的大类技术，旨在描绘碳中和宏大的技术图景一角，激发后续研究不断完善。

3.1 全面革新工业革命以来以化石能源为主导的能源体系，构建以非化石能源为主体的近零碳能源新结构

聚焦能源转化存储利用“原理-工艺-过程-系统”4 个层次，重点研究以下重大科技问题，并引导相关关键技术突破。

（1）碳基能源分子高效洁净利用与转化的物化基础与过程。能源和工业结构中大规模存量化石能源的清洁高效转化利用是当务之急。近期：重点研究 C-H、C-O、C-C 等含能化学键的有效活化、结构再造与能量存储新路线等关键科学问题，发展碳基能源高效催化转化、新型热力循环与高效热功转换系统、多点源污染物一体化控制等清洁低碳技术；中远期：推进化石能源与新能源的耦合利用，化石能源发展重点将由碳燃料向碳材料转变，以实现宝贵碳资源高附加值利用。

（2）可再生能源高效转化利用变革性原理和低成本规模化储能新方法。① 在可再生能源高效转化利用方面，优先推进构建高比例可再生能源系统替代化石能源。近期：重点研发太阳能高效低成本光电光热转化、深海高空风电高效转化、生物质高效转化与高值利用、海洋能规模化高效利用、分布式多能互补与供需互动、灵活友好并网等关键核心技术；中远期：以促进高比例可再生能源电力消纳与多能源载体综合利用，大幅增加可再生能源在能源生产和消费中的比重，并逐步成为主体能源。② 在低成本规模化储能方面，开发超越传统体系的储能新材料与系统，研究电/热/机械能与化学能之间相互转化规律。近期：加快推进大规模长寿命物理储能技术应用；中远期：发展新型电化学能量储存与

碳基能源分子高效洁净利用与转化的物化基础与过程
- 低碳制清洁燃料&化学品（近-中）
- 清洁燃烧与高效发电（近）
- 多点源污染物一体控制（近-中）

可再生能源高效转化利用变革性原理和低成本规模化储能新方法
- 太阳能高效转化利用（近-中）
- 深海高空风电高效转化（中）
- 生物质高效转化与高值利用（中）
- 海洋能规模化高效利用（中-远）
- 地热利用与深层开采（中-远）
- 大规模长寿命物理储能（近-中）
- 新型高能电化学储能（中-远）

先进核裂变与可控核聚变安全高效利用
- 先进核燃料循环系统（中）
- 核能非电综合利用（中）
- 乏燃料后处理与高放废物安全处理处置（中）
- 可控核聚变（远）

新能源化学体系构建
- 绿氢/氨制备（近-中）
- 绿氢/氨高效储运（近-中）
- 燃料电池及系统集成（中-远）
- 绿氢/氨多场景应用（中-远）

新型电力系统多时空耦合与系统形态演化
- 交直流混联电网（近-中）
- 新能源发电并网消纳（近-中）
- 多能互补与供需互动（近-中）
- 新型电力电子装备（近-中）

能势匹配和多能互补综合利用
- 能的综合互补利用（近-中）
- 多能系统规划设计及运行管理（近-中）
- 能源系统智慧化（中-远）
- 多能源载体多能融合（中-远）

绿色冶金过程工程
- 冶金节能增效技术（近-中）
- 冶金电气化应用（近-中）
- 生物质/氢燃料替代（中-远）
- 短流程冶金工艺（中-远）
- 氢冶金（中-远）
- 钢化联产（中-远）
- 物质能量循环利用（中-远）
- 有色湿法冶金工艺（中-远）
- 有色生物冶金工艺（远）
- 冶金+CCUS（中-远）

可持续绿色化工材料与工艺过程
- 化工节能增效技术（近-中）
- 分子炼油与分子转化（近-中）
- 分子炼煤（近-中）
- 绿氢与化工融合（中-远）
- 可再生能源驱动化工合成（中-远）
- 化工+CCUS（中-远）

低碳建材与工艺过程
- 建材节能增效技术（近-中）
- 过程电气化应用（中-远）
- 低碳水泥原材料替代（中-远）
- 绿氢直燃（中-远）
- 清洁替代燃料煅烧(中-远)
- 建材+CCUS（中-远）

绿色节能与智能建筑设计理论与方法
- 建筑节能增效技术（近-中）
- 建筑电气化（近-中）
- 零碳供热和制冷（近-中）
- 低碳燃料（近-中）
- 新型围护结构和环境控制系统（中-远）
- 建筑智能化技术（中-远）

智能低碳交通系统
- 交通节能技术（近-中）
- 交通电气化技术（近-中）
- 低碳航空海运燃料（中-远）
- 智能网联交通系统（中-远）

碳元素高效转化和循环利用
- CO_2捕集（近-中）
- CO_2运输（近-中）
- CO_2地质利用与封存（近-中）
- CO_2转化制燃料和化学品（中-远）
- CO_2矿物转化、固定和利用（远）
- CO_2生物转化利用（远）

气候变化背景下区域生态系统碳收支及其循环过程机制
- 刻画碳循环复杂过程的地球系统模型（近-中）
- 天空地一体化温室气体观测系统（近-中）
- 温室气体源-汇清单核算方法（近-中）

基于自然的解决方案研究
- 生态保护与修复技术（近-中）
- 土壤增汇技术（近-中）
- 森林增汇技术（近-中）
- 草原增汇技术（近-中）
- 湿地增汇技术（中-远）
- 海洋增汇技术（中-远）

化石燃料清洁高效利用
可再生能源与储能
先进核能
氢/氨新能源
新型电力系统
多能融合
绿色冶金
可持续绿色化工
低碳建材
绿色建筑
低碳交通
碳收支及其循环过程机制
基于自然的解决方案研究
碳元素高效转化和循环利用
零碳能源体系
低碳产业流程
生态固碳增汇/负排放
减排
CO_2
碳中和
增汇

图3　碳中和工作涉及的重要科技问题

Figure 3　Important science and technology problems involved in carbon neutrality

每类技术后附括号内的“近、中、远”是指预计实现技术成熟大规模应用的时期

The near, medium and long term in parentheses for each type of technology refers to the period when the technology is expected to achieve mature and large-scale applications

转化机制，以变革传统锂离子电池为代表的储能体系，实现长寿命、低成本、高能量密度、高安全和易回收的新型储能技术广泛应用。

（3）先进核裂变与可控核聚变安全高效利用。发展安全、高效、经济、可持续的先进核能系统。近中期：攻克先进核裂变能燃料循环、裂变燃料增殖与嬗变及核能多用途利用等重大科技问题；远期：瞄准长远持续推进聚变堆实验与示范，攻关磁约束聚变和惯性约束聚变核物理基础科学与关键技术问题，到21世纪中叶实现聚变商用，充分发挥核能战略性能源作用。

（4）新能源化学体系构建。推动氢/氨等新能源化学体系的建立，解决新能源开发与转化过程中的重大科学问题。近期：加快发展低碳高效的绿氢/氨制备、储运技术；中远期：开发不同场景下基于氢/氨的新型系统概念，以氢/氨作为关键能源载体实现多种能源资源的灵活互补，并通过转化为电/热/气或作为替代原料促进多个难减排工业部门的脱碳。

（5）新型电力系统多时空耦合与系统形态演化。构建新型电力系统，实现高比例的新能源广泛接入、高弹性电网灵活可靠配置资源和高度电气化的终端负荷多元互动。近中期：研究提升电力系统的灵活调节能力，加强新能源消纳和存储，并推动源网荷储的互动融合，提升系统运行效率，实现高比例新能源充分利用与多种能源和谐互济；中远期：促进人工智能、大数据、物联网先进信息通信等技术与电力技术的深度融合，形成具有我国自主知识产权的新型电力系统关键技术体系。

（6）能势匹配和多能互补综合利用。未来能源体系将发展为多能融合综合系统，需攻克能源生产、输配、存储、消费等环节的多能耦合和优化互补核心科技问题。近中期：深入探索能源的综合互补利用原理及关键技术，开发多能系统规划设计及运行管理技术；中远期：能源体系发展为多能融合综合系统，深度融合新一代信息技术形成智慧能源新产业，保障能源利用与生态文明同步协调发展。

3.2 推动钢铁、水泥、化工、有色冶金等高碳工业生产流程的低碳再造，促进交通和建筑行业电气化和燃料替代

聚焦工业原料/燃料替代、过程工艺革新、能量梯级回收和资源循环利用，重点研究以下重大科技问题，并引导相关关键技术突破。

（1）绿色冶金过程工程。① 钢铁冶炼领域。近期：大力推进钢铁业电气化应用技术、节能增效技术、物质能量回收技术；中远期：发展纯氢和合成气等为还原剂的新型低碳钢铁冶炼体系，变革目前碳为还原剂的“高炉-转炉”长流程，构筑“直接还原-电炉”短流程新冶金技术体系，同时在钢铁全产业链深度融合二氧化碳低成本捕集、合成化学品等减排技术，推进钢化联产融合发展。② 有色金属冶炼领域。近期：发展有色金属短流程制备技术，提高有色冶金业的电气化水平；中期：发展生物质、氢燃料替代化石能源，推进有色金属回收与循环利用；远期：开发湿法冶金、生物冶金等颠覆性流程再造工艺。

（2）可持续绿色化工材料与工艺过程。近中期：突破石油化工新的分子炼油与分子转化平台技术，针对煤中碳组分高效分离和碳结构精准调变发展“分子炼煤”技术，在分子水平上认识化石资源组成及转化规律实现炼化增效，结合能源结构的变革，实现化工转化以油品为主向高附加值的化学品、材料转型；中远期：研究发展绿色碳科学，重点研究可再生能源/氢与重要化工和化学品生产过程的深度耦合途径，发展全流程可再生能源驱动合成甲醇、氨、烯烃及芳烃等平台化合物，促进高效转化利用非化石资源的可再生碳资源（二氧化碳和生物质）。

（3）低碳建材与工艺过程。近期：重点发展低钙熟料水泥、非碳酸盐钙质原料替代技术、节能增效技术；中远期：发展过程电气化，应用生物质、氢等清洁替代燃料，研发太阳能供热窑炉系统等流程再造、非钙体系胶凝材料等颠覆性技术重构水泥生产工艺，并在水泥行业深度融合二氧化碳低成本捕集、合成化学品、矿化固定、封存等减排技术。

（4）绿色节能与智能建筑设计理论与方法。近期：大幅提升建筑业的电气化水平，推广成熟的建筑节能技术；中期：推进零碳供热制冷、低碳燃料、电力供需平衡优化；远期：发展需求可调的零碳建筑设计与环境营造技术、建筑智能化技术等。

（5）智能低碳交通系统。近中期：大幅提升交通业的电气化水平，特别是道路和铁路交通；中远期：推广氢/氨燃料替代、生物质燃料替代在长距离重型货运、航空、海运等难减排领域的应用，发展基于先进信息技术的智能交通运输系统。

3.3 保护并增强陆地和海洋生态系统的固碳能力，发展碳转化利用等相关负排放科技

聚焦揭示生态系统碳汇格局、过程机制、演化趋

势与潜力评估，重点研究以下重大科技问题，并引导相关关键方向研究。

（1）碳收支监测与自然碳汇潜力。系统监测与评估生态系统碳循环过程及其固碳功能。开展碳循环过程多维观测，构建天空地联网综合观测体系和下一代地球系统模型，认识生态系统碳循环过程及其时空演变机制，量化陆地和海洋生态系统的碳汇容量与固碳速率。揭示生态系统碳汇功能稳定性、增汇效应稳定性和持续性的生态学机制，制定温室气体源-汇清单核算方法，综合评估陆地和海洋生态系统的增汇潜力。

（2）推行“基于自然的解决方案”[⑫]。发挥、保护、可持续管理和修复生态系统带来的增汇潜力。从气候与生物多样性协同的角度深入研发和推进“基于自然的解决方案”相关工作，发展山水林田湖草沙生态一体化保护和修复技术，广泛应用可持续森林与草地管理技术，以及示范农业、草地和湿地增汇技术；中远期：加强海洋蓝碳增汇研究，海洋和植被丰富的沿海生态系统（如红树林、潮汐沼泽和海草床）将是未来蓝碳研究的重点。

（3）碳元素高效转化和循环利用。发展二氧化碳捕集、转化和耦合利用相关的负排放技术。近中期：重点发展第二代捕集技术，实现二氧化碳源头低能耗捕集在碳密集型行业的规模应用；中远期：实现高效光、电、热、生物转化利用二氧化碳机理等方面关键突破，开发高效定向转化合成有机含氧化学品、油品新工艺，发展高效光/电解水与二氧化碳还原耦合的光/电能和化学能循环利用方法，实现碳循环利用。

4 我国碳中和工作的挑战与建议

实现碳中和必将带来一场广泛而深刻的经济社会变革。当前，我国需要着重提升支撑碳中和的高水平科技自立自强能力，围绕能源生产与消费革命、工业过程与重点领域/难减排领域低碳转型、生态固碳增汇等方面，加大零碳/负碳颠覆性技术开发和成熟低碳技术在电力、工业、建筑、交通等重点领域应用推广，推动关键技术集成示范并打造系统性解决方案，构建政府、企业、科技界、媒体、公众等立体化的推进参与机制。为此，提出6点对策建议。

（1）加快研究制定和完善应对气候变化相关法律，持续加强政府主导、各部门分工负责的碳排放管理体系。目前，关于碳减排相关法律法规建设还处于起步阶段，系统性有待加强；特别是围绕碳减排目标、减排制度、管理体制上需要建立体系化的立法框架，以强化国家碳中和战略的有序深入推进。建议加快研究制定应对气候变化法律，赋予碳达峰、碳中和目标法律约束力，增强相关制度和政策的长期稳健性，保障参与主体的合法权益，强化绿色低碳投资的市场信心。完善现有法律法规体系，如《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国森林法》等，确保其与碳中和目标一致。通过明确政府、行业部门、企业、公民各方责任义务，构建国家统一管理和地方、部门分工负责相结合的碳排放管理体制和工作机制。在法律法规框架下，完善金融、市场、科技相关政策，统筹制定并持续更新国家、区域和各部门的碳达峰、碳中和中长期时间表、路线图和施工图。

（2）持续强化面向碳中和的科技研发体系，加快低碳、零碳、负碳前沿科技突破。将高水平科技自立自强置于我国碳中和科技创新的核心，持续强化多部门广泛参与、分工明确、有机协作的碳中和领域科技研发体系。发挥国家科研机构、高水平研究型大学、科技领军企业等国家战略科技力量的不同优势，布局面向碳中和重大科技需求的国家科技创新基地体系，建设一批高水平国家实验室、全国重点实验室、国

⑫ 基于自然的解决方案（Nature-based Solution，NbS）是指通过保护、可持续地管理和修复自然或人工的生态系统，来高效、灵活地应对社会发展的挑战，同时造福人类并有助于生物多样性。

家工程研究中心、国家技术创新中心等。从碳中和领域研究国际前沿和经济社会发展实际问题中不断凝练重大科学问题，聚焦核心关键技术清单，突破基础理论和技术原理，加快形成前沿基础研究和核心技术攻关的强大合力，建立基础科学、应用研究、产业部署和示范有机联动的碳中和科技研发模式，打造自主可控、国际领先的碳中和核心技术体系。

（3）推进能源革命，瞄准建立非化石能源为主的零碳能源结构和以新能源为主体的新型电力系统积极布局。近期内对于存量化石能源，支撑煤电由主体电源向电力保障和调峰的基础性电源转变，化石能源转化利用重心由“碳燃料”向“碳材料”转变。中远期要显著提高非化石能源在能源结构中的比重，优先发展新一代高效低成本可再生能源、安全先进核能系统、新型电化学能源转化与存储等颠覆性零碳能源技术。构建新型电力系统还需大力发展高比例新能源并网消纳、先进电网、多能互补与供需互动、大规模储能、新型电力电子装备、数字技术等关键技术。发展氢/氨燃料、生物能源、低品位余热利用等零碳燃料技术，以满足高品位热能、高能量密度燃料等非电用能需求。最终构建清洁低碳、安全高效、多能融合的现代能源体系。

（4）加快构建低碳产业体系，构建变革性智能化绿色生产过程技术体系。制定化工、水泥、钢铁、有色等高耗能和高排放行业发展的绿色低碳转型中长期发展规划，分阶段细化发展目标和重点任务。近中期重点通过电气化应用、燃料/原料替代、高效节能技术，大幅削减工业过程原料反应和化石能源使用造成的碳排放。中远期发展物质能量循环与再利用技术，包括持续发展原生资源高效加工转化、废弃物再资源化技术，加强资源的全生命周期管理与利用，以及在重点领域/难减排领域开展颠覆性零碳/低碳工业流程再造，加强对氢/氨、可再生能源、CCUS 等减排技术的综合应用，如氢还原炼铁、绿色化工、生物冶金等。

（5）持续推进生态建设，提高自然固碳增汇能力，前瞻部署负排放技术研发与示范工作。近期需完善生态碳储量核算、碳汇能力提升潜力评估等方法体系，持续开展生态保护与修复；中远期加强森林绿碳、海洋蓝碳等固碳增汇技术的研发与推广工作，利用人工干预生物过程和生态工程技术增加土壤、森林、草原、湿地、海洋等碳汇能力，大幅提升生态系统固碳水平。针对实现能源系统净零负排放和抵消难减排产业碳排放的需求，近中期以二氧化碳规模化减排和资源化利用为重点，有序推进 CCUS 技术在火电、化工、钢铁等产业的全流程融合示范，加强跨行业、跨领域的技术集成；着眼长远前瞻部署生物能源碳捕集与封存（BECCS）、直接空气捕集、矿物碳化、生物炭、地球工程等前沿负排放技术的研发与示范工作。

（6）推动全产业链条碳中和技术的集成应用示范，加强系统性解决方案在碳中和行动中的普遍应用。加快打造多能融合综合系统，促进能源化工互补耦合、钢铁化工联产、可再生能源绿氢与煤化工融合发展，协同解决能源转化和工业生产过程的高能耗高排放难题。系统评估碳中和愿景下关键技术跨系统大规模应用的经济-社会-环境-气候-健康综合影响，统筹推进分区域和分部门的低碳、零碳和负碳技术发展。推动人工智能、数字化等新一代信息技术在能源、工业和生态领域的广泛应用。发展碳中和创新战略与决策支撑系统等管理支撑技术，推进系统性解决方案在碳中和行动中的部署应用。

致谢 中国科学院西北生态环境资源研究院资源生态环境战略情报研究团队、中国科学院武汉文献情报中心先进能源科技战略情报研究团队、中国科学院文献情报中心生态文明情报研究团队和中国科学院成都文献情报中心生物与信息团队等对本文亦有贡献，特致谢忱。

参考文献

1 Intergovernmental Panel on Climate Change. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Global Warming of 1.5℃. (2018-10-08)[2022-03-29]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf.

2 United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement. (2015-12-12)[2022-03-29]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.

3 刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施. 阅江学刊, 2021, 13(2): 48-60.

Liu C S. Scientific Connotation, Construction path and policy measures of carbon neutrality. Yuejiang Academic Journal, 2021, 13(2): 48-60. (in Chinese)

4 British Standards Institution (BSI). PAS 2060 2010 Specification for the Demonstration of Carbon Neutrality. UK: BSI Standards Limited, 2010.

5 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.

Zhang Y X, Luo H L, Wang C. Progress and trends of global carbon neutrality pledges. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88-97. (in Chinese)

6 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓"碳中和"？. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.

Deng X, Xie J, Teng F. What is carbon neutrality?. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113. (in Chinese)

7 United Nations Environment Program. Emissions Gap Report 2020. (2020-12-09)[2022-03-29]. https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020.

8 International Energy Agency. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. (2021-05-18)[2022-03-29]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-12/IEA%2C%20Net%20Zero%20by%202050.pdf.

9 International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook: 1.5℃ Pathway. (2021-06-01)[2022-03-29]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf.

10 United Nations Global Compact. Corporate Net Zero Pathway: Delivering the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals. (2021-07-27)[2022-03-29]. https://web-assets.bcg.com/7e/e2/e235059445a78a6d4079914552f6/bcg-ungc-corporate-net-zero-pathway-july-2021-eng.pdf.

11 The Royal Society. A Net Zero Climate-resilient Future: Science, Technology and the Solutions for Change. (2021-05-01)[2022-03-23]. https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climate-science-solutions-overview.pdf.

12 European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-neutral Europe. (2020-07-08)[2022-03-24]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN.

13 UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy. UK Hydrogen Strategy. (2021-08-01)[2022-03-23]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf.

14 Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues. Basic Hydrogen Strategy. (2017-12-26)[2022-03-29]. https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf.

15 U.S. Department of Energy. Department of Energy Hydrogen Program Plan. (2020-11-01)[2022-03-29]. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf.

16 Government of Korea. Hydrogen Economy Roadmap of Korea. (2019-01-01)[2022-03-29]. https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_551e67dca75340569e68e37eea18f28e.pdf.

17 European Commission. A Clean Planet for All: A European Strategic Long-term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy. (2018-12-07)[2022-03-29]. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/european_commission_-_a_european_strategic_long_term_vision_for_a_prosperous_modern_competitive_and_climate_neutral_economy.pdf.

18 European Commission. A European Green Deal. (2019-12-11)[2022-03-29]. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-

01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.

19 European Commission. European climate law. European Commission. European climate law. (2020-03-04)[2022-03-24]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=EN.

20 European Commission. Powering a Climate-neutral Economy: An EU Strategy for Energy System Integration. (2020-07-08)[2022-03-24]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0299&from=EN.

21 ETIP SNET. ETIP SNET R&I Roadmap 2020-2030. (2020-03-03)[2022-03-29]. https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2020/02/Roadmap-2020-2030_June-UPDT.pdf.

22 European Commission. A New Industrial Strategy for Europe. (2020-03-10)[2022-03-29]. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020_en.pdf.

23 European Commission. Circular Economy Action Plan. (2020-03-10)[2022-03-29]. https://emf.thirdlight.com/link/l3i96x2za3la-8o3wq5/@/#id=0.

24 European Commission. EU Biodiversity Strategy for 2030. (2020-05-20)[2022-03-29]. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

25 European Commission. Forests-new EU Strategy. (2021-07-16)[2022-03-29]. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0d918e07-e610-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

26 秦阿宁, 孙玉玲, 王燕鹏, 等. 碳中和背景下的国际绿色技术发展态势分析. 世界科技研究与发展, 2021, 43(4): 385-402.
Qin A N, Sun Y L, Wang Y P, et al. Analysis on the development trend of international green technology under the background of carbon neutrality. World Sci-Tech R&D, 2021, 43(4): 385-402. (in Chinese)

27 UK. The Climate Change Act 2008 (2050 Target Amendment) Order 2019. (2018-02-01)[2022-03-29]. https://www.legislation.gov.uk/ukdsi/2019/9780111187654/pdfs/ukdsiem_9780111187654_en.pdf.

28 UK HM Treasury. The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. (2020-11-18)[2022-03-29]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf.

29 UK HM Treasury. National Infrastructure Strategy. (2021-08-27)[2022-03-29]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/938049/NIS_final_web_single_page.pdf.

30 UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Energy White Paper: Powering Our Net Zero Future. (2020-12-16)[2022-03-29]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/945899/201216_BEIS_EWP_Command_Paper_Accessible.pdf.

31 UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS). Industrial Decarbonisation Strategy. (2021-03-17)[2022-03-29]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/970229/Industrial_Decarbonisation_Strategy_March_2021.pdf.

32 UK Department for Transport. Decarbonising Transport: A Better, Greener Britain. (2021-07-14)[2022-03-29]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1009448/decarbonising-transport-a-better-greener-britain.pdf.

33 U. S. Senate Energy and Natural Resources Committee. American Energy Innovation Act. (2020-05-27)[2022-03-29]. https://www.energy.senate.gov/services/files/4BC53A6A-C275-44DE-9BB5-D973702F8F93.

34 U.S. Department of Energy. Energy Storage Grand Challenge Roadmap. (2020-12-21)[2022-03-29]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Grand%20Challenge%20Roadmap.pdf.

35 Committee on Energy & Commerce. Clean Future Act. (2020-08-01)[2022-03-29]. https://energycommerce.house.gov/sites/democrats.energycommerce.house.gov/files/documents/CLEAN%20Future%20Act%20Memo%2001.08.20.pdf.

36 METI. The Decision of Green Growth Strategy with Carbon Neutrality in 2050. (2020-12-25)[2022-03-29]. https://www.

meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf.

37 METI. Green Growth Strategy with Carbon Neutrality in 2050. (2021-06-18)[2022-03-29]. https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf.

38 United Nations Framework Convention on Climate Change. 2050 Carbon Neutral Strategy of The Republic of Korea: Towards a Sustainable and Green Society. (2020-12-01)[2022-03-29]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf.

39 Ministry of Economy and Finance. Government Releases an English Booklet on the Korean New Deal. (2020-07-28)[2022-03-29]. https://english.moef.go.kr/skin/doc.html?fn=Korean%20New%20Deal.pdf&rs=/result/upload/mini/2020/07/.

40 Ministry of Science and ICT. Strategy for Technology Innovation for Carbon Neutral. (2021-03-31)[2022-03-29]. https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/sg05rg/sdtd/20211019/Documents/Sanghun_LEE.pdf.

Analysis of International Carbon Neutralization Strategic Actions and Technology Layout and Enlightenment Suggestions to China

QU Jiansheng[1,5*] CHEN Wei[2,5*] ZENG Jingjing[3,5] SUN Yuling[4,5] LIAO Qin[3] GUO Kaimo[2] QIN Aning[4] PEI Huijuan[3] TENG Fei[4] LIU Yanfei[3] YUE Fang[2] LIU Li'na[3] TANG Yun[2] LI Lanchun[2]

(1 Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2 Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
3 Lanzhou Information Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
4 National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
5 School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Achieving carbon peak and carbon neutrality goals is a major strategic decision made by the Chinese government, which will bring extensive and profound systemic changes for the economy and society. S&T is the core driving force that supports the goal of carbon neutrality. On the basis of the related concepts of carbon neutrality, this study analyzes the strategic actions and the characteristics of technological layout of carbon neutrality in developed countries/regions and international organizations. Major countries have promoted carbon neutrality through legislative regulation, energy strategies, technology roadmaps, carbon markets and other policy actions. They focus on deploying transformative green low-carbon technologies, such as hydrogen, CCUS, renewable energy, energy storage, nuclear energy, and clean power, to seize the technological commanding heights of the future green industrial revolution. Based on the two fundamental paths of achieving carbon neutrality — "emission reduction", "increasing sinks", and three research directions—"building a zero-carbon energy system", "rebuilding low-carbon industrial processes", and "ecological carbon sequestration and increasing sinks/negative emissions", this study puts forward 14 important scientific issues aiming to guide more than 70 key technological breakthroughs. On the basis of all findings, 6 suggestions are proposed for China's carbon neutrality strategy and technological layout as they are (1) strengthen the top-level design and scientific planning of the action plan for carbon neutrality; (2) accelerate the construction of the technology supporting system for carbon neutrality; (3) establish a zero-carbon energy system and a new power system; (4) accelerate the construction of the low-carbon industrial system; (5) promote the prospective applications of negative carbon emission technologies and the ecological carbon sequestrations; (6) Enhance the application of systematic solutions in carbon neutral strategic actions.

Keywords carbon neutrality, strategic action, technological innovation, zero carbon energy, low carbon industry, carbon sink

*Corresponding author



曲建升　中国科学院成都文献情报中心党委书记，中国科学院文献情报中心副主任，研究员，博士生导师。兼任中国地理学会文献情报工作组组长、中国地质学会科技情报专委会副主任等学术职务。主要从事环境与发展战略情报、碳排放评估等研究工作。作为联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告评审专家、《气候变化国家评估报告》首席作者等参与完成多项国内外重要规划评估任务。主持国家和省部级研究项目20余项，发表学术论文140余篇，出版专译著16部。E-mail: qujs@clas.ac.cn

QU Jiansheng　Secretary of the Party Committee of Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Associate Director of National Science Library, CAS. Professor and Ph.D. Supervisor. His research focuses on environmental and development policy and carbon emission assessment. He is also the leader of the Documentation and Information Working Group of the Geographical Society of China and the Associate Director of the Committee of Scientific and Technological Information of the Geological Society of China. As the expert reviewer of the IPCC Fifth Assessment Report and the Lead Author of the National Assessment Report on Climate Change, he has participated in several important planning and assessment tasks. He has presided more than 20 research projects of national/provincial/ministerial-level, published over 140 research papers and 16 academic books. E-mail: qujs@clas.ac.cn



陈　伟　中国科学院武汉文献情报中心战略情报部副主任、先进能源科技战略情报研究团队负责人、研究馆员，中国科学院大学经济与管理学院硕士生导师。兼任中国发展战略学研究会智库专业委员会委员等多个学术职务。长期从事能源科技战略与政策研究，主持和参加了30多项国家和省部级战略研究课题，发表论文50余篇，出版10余部专译著，以第一完成人身份获得国家能源局能源软科学研究优秀成果奖、湖北省科技信息成果奖3项。E-mail: chenw@whlib.ac.cn

CHEN Wei　Deputy Director and research librarian of Information Analysis Department of Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences. He is also the Master's Supervisor at the School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Member of Think Tank Professional Committee of Chinese Association of Development Strategy Studies, etc. His research interest mainly focuses on energy technology strategic research. In recent years, he has hosted and participated in more than 30 high-level strategic research projects, published more than 50 papers, and published more than 10 monographs. As the principal investigator, he has won the Outstanding Achievement Award of Energy Soft Science Research of the National Energy Administration, and the Hubei Science and Technology Information Achievement Award.
E-mail: chenw@whlib.ac.cn

■责任编辑：文彦杰